

建築構造用高溶接性590N/mm²鋼の開発

Development of 590 N/mm² Class Steel with Good Weldability for Building Structures

渡 部 義 之^{*(1)} 石 橋 清 司^{*(2)} 吉 井 健 一^{*(1)} 井 上 肇^{*(1)}
 Yoshiyuki WATANABE Kiyoshi ISHIBASHI Ken'ichi YOSHII Hajime INOUE
 吉 田 謙^{*(3)}
 Yuzuru YOSHIDA

抄 録

Bフリー低C成分を基本にCuなどの析出硬化を利用することで、溶接時の予熱低減ないしは予熱フリー化を可能にする低 P_{cm} 型BT-HT440(SA440)鋼を開発した。本鋼材は、従来SA440鋼に比較して溶接性を大幅に改善したことが大きな特徴であるが、大臣認定品建築構造用高性能590 N/mm²鋼材(SA440B, C)に準拠しており、その他の使用性能は従来鋼と何ら変わりなく、従来鋼と同等に使用することが可能である。

Abstract

By utilizing the precipitation hardening such as Cu, under composition of B free and low C steel, low P_{cm} type BT-HT440 (SA440) steel, the preheating temperature in welding which can be reduced or free, has been developed. This steel of which the weldability was improved is also equivalent to the conventional SA440 steel on the other performance. Therefore, it can completely and similarly use the developed steel with the conventional steels. The developed steel follows it for High-performance 590 N/mm² steel for building structures (SA440B, C).

1. 緒 言

建築構造用としての引張強さ400、490N/mm²級厚鋼板は、JISのSN400、490鋼、あるいは建設大臣(現国土交通大臣)の材料一般認定を取得した新日本製鐵規格BT-HT(ビルテン®・ハイテン)325、355鋼があり、低層から高層建築物まで幅広く用いられている¹⁾。一方、引張強さ590 N/mm²級鋼は、“建築構造用高性能590 N/mm²鋼材(SA440B, C)”²⁾新日本製鐵規格BT-HT440が(財)日本建築センター鋼構造評定委員会の評定を経て、1996年、建設省(現国土交通省)大臣認定を取得した。当該鋼材は、横浜ランドマークタワーなどの高層ないし超高層建築物における鋼管柱や4面溶接ボックス断面柱などとして実用に供されている。

SA440鋼は、建設省(現国土交通省)総合技術開発プロジェクト“高性能鋼”で検討された建物の耐震性を確保するために不可欠な性能と、590 N/mm²級の高強度を確保した建築構造用鋼で、表1に主な仕様を示す通り、以下のような特徴を有している。

- (1) 建築用として必要な降伏比(YR)、降伏強さ(YP)のばらつき制御、溶接性の確保
 - (2) 設計基準強度F値は、440 N/mm²であり、従来のSN490(F=325 N/mm²)等に比べて有利な強度を確保
 - (3) 板厚が40mmを超えても強度の低減がない
- SA440(BT-HT440)鋼は、炭素当量(C_{eq})や溶接割れ感受性組成

(P_{cm})を抑え溶接性を考慮した鋼材であるが、建築構造用として広く用いられている400~490 N/mm²級鋼材に比べると、強度、成分含有量が高く、施工経験も浅いためその品質確保に十分な配慮が必要である。このため、(社)鋼材倶楽部(現(社)日本鉄鋼連盟)・高性能鋼利用技術小委員会は、SA440鋼の設計・溶接施工指針の中で、表2に示すような溶接時における溶接割れ防止のための予熱温度の目安を示した。ただし、溶接割れは鋼材の化学成分や板厚、溶着金属の水素量、継手の拘束度などにより影響を受けるため、表2の予熱温度はある程度の安全代を見込んだものとされている。また、実際の予熱温度の設定に当たっては、実施工に使用する鋼材、溶接材料を用いたJIS Z 3158に規定されるy形溶接割れ試験による確認試験をすることが望ましいとされている。

このような背景の下、予熱フリーを達成し得る高溶接性SA440鋼の開発が待たれていた。新日本製鐵では、鋼成分の最適化と最新の鋼板製造技術を駆使することにより、 P_{cm} を低く抑えた“建築構造用高溶接性590 N/mm²鋼”を開発したので以下に報告する。

2. 開発の基本的な考え方

新日本製鐵の溶接構造用厚鋼板は、WEL-TEN®シリーズとして橋梁、水圧鉄管、建築、建設・産業機械、各種のタンクなど各分野で幅広く使用されている。なかでも、引張強さ590 N/mm²級鋼(WEL-TEN 590, 610シリーズ)は、溶接冷間割れ性の観点から、 C_{eq} 、 P_{cm} の

⁽¹⁾ 君津製鐵所 厚板工場 厚板管理グループ マネジャー
 千葉県君津市君津1 〒299-1141 TEL0439-50-2283

⁽²⁾ 君津製鐵所 厚板工場 厚板管理グループ

⁽³⁾ 厚板営業部 厚板商品技術グループ マネジャー

表1 SA440鋼の主な仕様
Specification for SA440 steel
Chemical composition (mass%)

Specification	Plate thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S
SA440B	19 - 100	0.08	0.55	1.60	0.030	0.008
SA440C					0.020	

Carbon equivalent (C_{eq}) and weld cracking parameter (P_{cm})

Specification	Plate thickness (mm)	C_{eq} (%)	P_{cm} (%)
SA440B	40	0.44	0.28
SA440C	> 40	0.47	0.30

$$C_{eq} = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

$$P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

Mechanical properties

Specification	Plate thickness (mm)	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Yield ratio (%)	Elongation* (%)	Charpy absorbed energy [0] (J)	Reduction of area through-thickness direction (%)
SA440B	19 - 100	440 - 540	590 - 740	80	20(26)	47	-
SA440C							25

*Test piece: JIS Z 2201 - No.4 (No.5)

表2 SA440鋼の本溶接における一般的予熱温度
Guideline of preheating temperatures in welding for SA440 steels

Welding method	Plate thickness, t (mm)			
	19 t 50	50 < t 75	75 < t 100	
SMAW	100	100	125	
GMAW	60	80	100	
SAW	60	80	100	
ESW	-	-	-	

低減化の研究開発、技術開発を進め、溶接時の予熱フリー化を達成してきた。一方、建築構造用鋼材は、耐震性の観点から低YR化が求められ、そのための重要な位置を占める金属組織制御手段は、冶金学的には高溶接性の方向とは必ずしも相容れないものと考えられてきた。

新日本製鐵では、最新の高溶接性鋼であるWEL-TENスーパーラックフリー(SCF)鋼の基本コンセプト：“Bフリー低C鋼 + 析出硬化利用”をベースとして、鋼成分の最適化と鋼板製造技術を駆使した高溶接性BT-HT440鋼の開発に取り組んできた。

まず、溶接時の予熱フリー化を達成するため、 P_{cm} は一般的な溶接施工において予熱が不要とされる0.22%以下を開発目標とした。低 P_{cm} 化にはC量の低減が最も効果的であるが、590 N/mm²級の強度確保や建築構造用鋼として求められる低YR化のため / 二相域熱処理時の二相分離の容易性などの観点から、C量の適正化がポイントの一つとなる。これには、他用途で開発された高溶接性590 N/mm²級ならびに780 N/mm²級鋼(スーパーラックフリー鋼)開発過程で蓄積された知見を最大限に活用した^{2,3)}。

また、Bフリー低C、低 P_{cm} 成分下で590 N/mm²級の強度確保のため析出硬化の利用が不可欠である。建築構造用鋼として低YR化、極厚4面溶接ボックス断面柱のダイヤフラム溶接部に適用されるエレクトロスラグ溶接のような超大入熱溶接時の靱性を考慮し、適切な析出硬化元素を利用した。特にCuは溶接性や溶接継手性能を大きく劣化させることなく特定量以上の添加で時効析出処理により顕著に強度を上昇させることが知られ、古くは、米国INCO社によって開発されたA710鋼^{4,5)}がある。新日本製鐵では、過去、高強度ラインパイプ用鋼⁶⁾や明石海峡大橋に採用された橋梁用高溶接性780 N/mm²鋼³⁾などに適用している。-Fe中に固溶したCuは、時効によりまずbcc-Cuとして整合析出し、その後双晶を有する9R構造の中間相を経て、過時効されるとfcc構造で母相 -Feと特定の結晶方位関係(Kurdjumov-Sachsの関係)をもった -Cuとして析出する⁷⁾。Cuによる析出硬化は、各種段階のものがそれぞれ寄与しているが、主に中間相によるものと考えられている。

3. 開発鋼の基本特性

前記基本コンセプトに基づいて、300トン転炉による実炉出鋼および厚板工場での実機圧延をおこなった。製造工程を図1に示す。建築構造用鋼として具備すべき各種特性を満たすため、脱ガスや厳格な成分調整のための二次精錬、連続鋳造時の中心偏析対策としての軽圧下など最新技術を駆使した。また、厚板圧延においては、加熱・圧延条件を適正に制御するとともに、優れた強度・靱性バランスと低YRを達成するための最適 / 二相域熱処理をおこなった。

表3に実炉溶製成分を示す。対象板厚に応じてC、Cu量は若干異

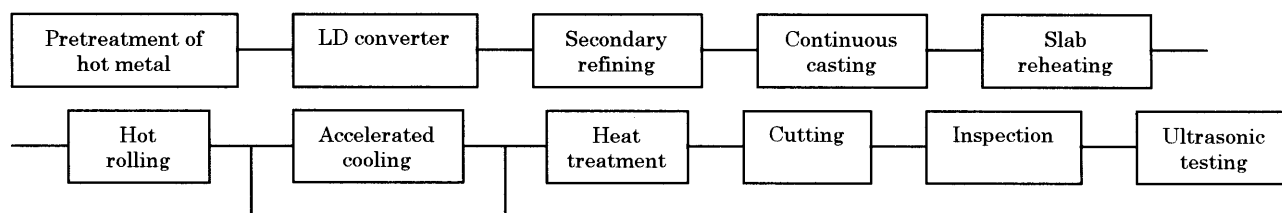


図1 製造工程
Manufacturing processes

表3 開発鋼の化学成分
Chemical composition of developed steels (mass %)

Steel	Plate thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Others	C _{eq}	P _{cm}
A	50	0.06	0.25	1.40	0.006	0.003	Cu,Ni,Cr,Mo,Nb,V,Ti	0.40	0.21
B	100								
C	19								
D	28	0.08	0.23	1.45	0.006	0.002	Cu,Ni,Cr,Nb,V,Ti	0.37	0.21
E	45								
F	50								
G	80	0.06	0.36	1.47	0.010	0.001	Cu,Ni,Cr,Mo,Nb,V,Ti	0.41	0.22

$$C_{eq} = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/60 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

$$P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

表4 開発鋼の機械的性質
Mechanical properties of developed steels

Steel	Plate thickness (mm)	Direction	Position in thickness	Tensile properties			
				Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Yield ratio (%)
A	50	Transverse	1/4-thickness	471	610	30	77
B	100			470	604	33	78
C	19			453	611	43	74
D	28			476	643	30	74
E	45			492	647	29	76
F	50			497	638	30	78
G	80			485	644	31	75

Steel	Plate thickness (mm)	Direction	Position in thickness	Charpy impact properties	
				Absorbed energy $\sqrt{E_0}$ [min./av.] (J)	Fracture appearance transition temperature (°C)
A	50	Longitudinal	1/4-thickness	195 / 227	-24
B	100			247 / 250	-40
C	19			278 / 285	-85
D	28			287 / 297	-73
E	45			256 / 260	-58
F	50			266 / 292	-33
G	80			329 / 336	-50

Steel	Plate thickness (mm)	Reduction of area through-thickness direction (%)	
		Each	Av.
C	19	70, 72, 71	71
D	28	76, 76, 77	76
E	45	72, 72, 76	73
F	50	74, 73, 71	73
G	80	74, 72, 73	73

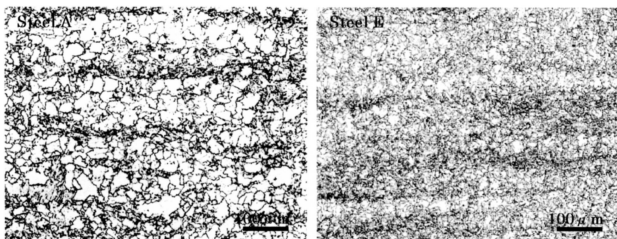


図2 代表的なマイクロ組織
Examples of the optical micrographs

なるが、いずれもC量を低く抑えることでP_{cm}も低く抑えられている。

表4に開発鋼の機械的性質を示す。強度、靱性を初めとする基本

特性は、SA440鋼として十分な特性を有している。一般に、析出硬化型鋼ではYRが高くなる傾向にあるが、いずれの板厚においてもSA440鋼の仕様である80%以下を満たしている。

なお、マイクロ組織は、図2に代表的な例を示すように、低YR化のための / 二相域熱処理をおこなっているため、微細なフェライトを伴ったベイナイト組織となっていることが特徴である。

4. 開発鋼の使用性能

開発鋼の特徴である溶接性を中心とした各種の使用性能を調査した。

4.1 溶接性

鋼材の溶接性を評価する試験の一つにJIS Z 3101に規定される「溶

接熱影響部の最高硬さ試験がある。当該試験における硬さが高いほど溶接冷間割れ感受性が高いとされている。図3に試験結果を示すように、C量、P_{cm}が低く抑えられた開発鋼(鋼A、F)は、最も硬化したケースでも最高硬さが300HVをわずかに上回る程度であることが分かる。一般的なSA440鋼では、予熱温度が100でも最高硬さは

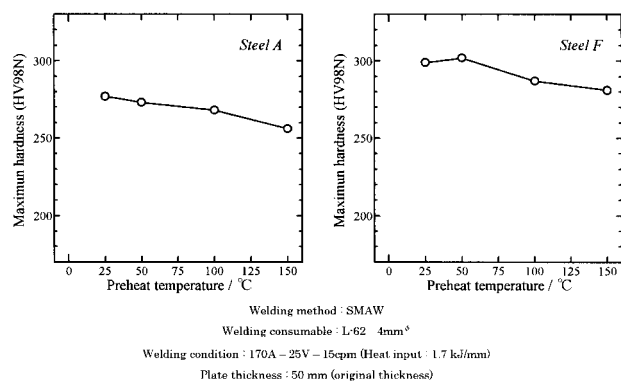


図3 溶接熱影響部の最高硬さ試験結果
Results of maximum HAZ hardness test

300HVを超えることが知られており、溶接熱影響部(HAZ)硬化性の低い開発鋼は溶接割れ感受性が低いと言える。

次に、直接的な溶接割れ感受性評価として、鋼A、E、Fに対してy形溶接割れ試験を実施した。表5に溶接条件ならびに試験結果を示す。被覆アーク溶接(SMAW)による予熱0での割れは、いずれも溶着金属での割れである。これは、溶接材料の水素量が高いのに加え、ドライアイスでの冷却のため、試験体に結露水が付着していたためと考えている。表5には、鋼Eについて雰囲気温度0に制御した恒温恒湿槽内で炭酸ガス半自動溶接(GMAW)で実施した結果も併記したが、溶着金属も含めまったく割れが発生していない。

以上の結果から、P_{cm}を低く抑えた開発鋼は、極めて優れた耐溶接冷間割れ性を示していると結論され、実施工においては、実質的に溶接時の予熱を省略することが可能と考えられる。

4.2 溶接継手性能

溶接継手性能評価として、4面溶接ボックス断面柱に適用されることの多いスキンプレート-ダイヤフラム部のエレクトロスラグ溶接(SESNET)、角部のサブマージアーク溶接(SAW)、ならびに柱-

表5 y形溶接割れ試験結果
Results of y-groove weld cracking test

Steel	Plate thickness (mm)	Welding method	Welding consumable	Welding condition				Preheat temperature ()	Cracking ratio (%)		
				Current (A)	Voltage (V)	Speed (cpm)	Heat input (kJ/mm)		Surface	Root	Section
A	50	SMAW	L-62 4mm	170	25	15	1.7	0	96*	100*	98*
								25	0	0	0
								50	0	0	0
E	45	GMAW	YM-60C 1.4mm	320	35	36	1.9	0	0	0	0
								25	0	0	0
								50	0	0	0
F	50	SMAW	L-62 4mm	170	25	15	1.7	0	100*	100*	100*
								25	0	0	0
								50	0	0	0

* : Cracking in weld metal

Note) Welding was conducted under atmosphere of 20 - 22 and 45 - 63%RH.

Only in the case of 0 preheating temperature of steel E, welding was carried out in the room which controlled the atmosphere under 0 ambient temperature.

表6 溶接条件
Welding conditions

Steel	A	A or F	A/B	F/G
Plate thickness (mm)	50	50	50/100	50/80
Welding position	Flat	Flat	Vertical	
Welding method	GMAW	SAW	SESNET	
Welding consumables	YM-60C (1.6mm)	Y-DM (4.8mm) × YF-15	YM-60A (1.6mm) × YF-15	
Welding condition	Welding current (A)	400	380	
	Welding voltage (V)	37	52	
	Welding speed (cpm)	35	1.65	1.60
	Heat input (kJ/mm)	2.5	4.5	71.9
Preheat and interpass temperature ()	Preheat temp. : none Interpass temp. : 150	Preheat temp. : none Interpass temp. : 150		
Groove shape				

梁仕口部の下向き炭酸ガス溶接 (GMAW) を想定した継手を表 6 に示す溶接条件で作製した。

表 7 に溶接継手引張試験結果, 図 4 にシャルピー衝撃試験結果を示す。SESNET溶接のような大入熱溶接においても極端な軟化は認められず, 十分な継手強度を有している。また, GMAW, SAWの継手靱性は溶着金属からHAZ全域にかけて, まったく問題ないレベルである。SESNET継手においても, 従来鋼と同等の靱性レベルを有している。しかしながら, 最近では, 溶接部に対し極めて高い靱性値 (例えば E_0 70J など) を要求される場合があり, その基準においては, SESNET継手の溶接溶融線 (FL) およびその近傍のHAZではやや低位である。新日本製鐵ではこれに対処するため, HTUFF技術を適用した高HAZ靱性鋼を別途開発している⁹⁾。溶接性を改善した本開発鋼に目的に応じてそれら技術を組み合わせることで, 大入熱溶接条件下での高HAZ靱性化も可能である。

5. 結 言

Bフリー低C化を基本にCuなどの析出硬化を利用することで, 溶接時の予熱低減ないしは予熱フリー化を可能にする低 P_{cm} 型BT-HT440 (SA440) 鋼を開発した。本鋼材は, 従来SA440鋼と比較して溶接性を大幅に改善したことが大きな特徴であるが, 大臣認定品建築構造用高性能590 N/mm²鋼材 (SA440B,C) に準拠しており, その他の使用性能は従来鋼と何ら変わりなく, 従来鋼と同等に使用することが可能である。このような特徴が認められ, 本鋼材は大阪市交通局建て替えプロジェクトなどに採用されている。

参考文献

- 1) 大橋 望月, 山口 萩原, 桑村 岡村, 富田 小松, 船津: 製鉄研究. (334), 17(1989)
- 2) 渡部 吉田, 為広 船戸, 西岡 岡村, 矢野: 新日鐵技報. (348), 17(1993)
- 3) 岡村 田中, 奥島 山場, 為広 井上, 糟谷 瀬戸: 新日鐵技報. (356), 62(1995)
- 4) U.S.Patent No.3692514, 1972
- 5) Jesseman, R.J. et al.: HSLA Steels Techno. & Appli. ASME, 1983, p.655
- 6) 為広 西岡, 村田 川田, 高橋: 製鉄研究. (337), 34(1990)
- 7) Othen, P.J., Jenkins, M.L., Smith, G.D.W.: Phil. Mag. 70A, 1(1994)
- 8) 児島 吉井, 秦 佐伯, 市川 吉田, 志村 東: 新日鐵技報. (380), 33(2004)

表7 溶接継手引張試験結果
Tensile properties of welded joints

Steel	Welding method	Heat input (kJ/mm)	TS (N/mm ²)	Fracture position
A	GMAW	2.5	643	Base material
			644	Base material
A	SAW	4.5	647	Base material
			648	Base material
A / B	SESNET	71.9	609 611	Base material Base material
F	SAW	4.5	673	Base material
			675	Base material
F / G	SESNET	71.3	638 635	Base material Base material

Test piece : JIS Z 3121 No.1

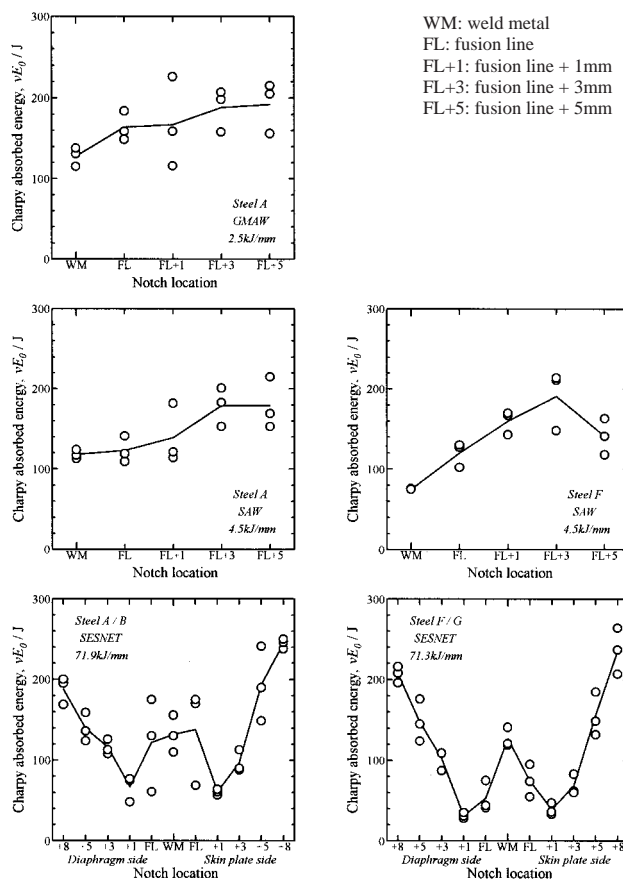


図 4 溶接継手シャルピー衝撃試験結果
Charpy impact properties of welded joints